

磁場の作用下における磁性流体液滴の挙動に関する研究

—第2報, 種々のノズル径と表面張力の影響—

千葉職業能力開発短期大学校 成田校 石橋 幸男
 港湾職業能力開発短期大学校 横浜校 高 芝 誉 康
 職業能力開発大学校 吉 田 信 也

A Study on the Behavior of Ferrofluid Drops in Magnetic Field
 (2nd Report Effects of Various Nozzle Diameters and Surface Tension)

Yukio ISHIBASHI, Shigeyasu TAKASHIBA, Shinya YOSHIDA

要約 磁性流体とはマグネタイト、ニッケル、コバルトなどの強磁性微粒子を界面活性剤で表面処理して液体中に分散させたコロイド溶液である。この流体は、重力や遠心力の作用下で凝集、沈澱など固液分離が生じることがなく、強い磁性を持った均質な流体として取り扱われている。磁性流体のこのような特性を利用した応用技術開発が機械、電気、科学、情報工学および医学などの各分野で活発に行われている。特に情報工学の発展に伴いインクジェットプリンタのインクに磁性流体が使用されているが、磁性インクはその磁気的性質を利用した液滴制御に関連して用いられることが多かった。しかし、磁性流体の液滴生成及び挙動についてのノズルに関する研究は、いまだ十分に理解が得られる状況には至っていない。本研究では細管ノズルから極めて規則的に液滴が放出される均一液滴領域での生成及び挙動ならびにそれに及ぼす諸因子の影響を調べるために、ノズル外径（ノズル内径一定）、ノズル内径（ノズル外径一定）、磁気体積力、流体流量を広範囲に変えたとともに、表面張力を変化させて実験を行い液滴生成の周期、液滴径について調べた。液滴生成の周期はノズル内径および磁気体積力が大きいほど短く、液滴径はノズル内径および表面張力が小さいほど小さくなる。さらに次元解析的考察により、液滴生成の周期、液滴径に大きく影響する因子を明らかにした。

I 緒 言

磁性流体とはマグネタイト、ニッケル、コバルトなどの強磁性微粒子を界面活性剤で表面処理して液体中に分散されたコロイド溶液である。この流体は重力や遠心力の作用下で凝集、沈澱など固液分離が生じることがなく、強い磁性を持った均質な流体として取扱われている。磁性流体のこのような特性を利用した応用技術開発が機械、電気、化学、情報工学及び医学などの各分野で活発に行われている。特に情報工学の発展に

に伴いインクジェットプリンタのインクに磁性流体が使用されているが、しかしこれまで磁性インクはその磁気的性質を利用した液滴制御に関連して用いられることが多かった^{(1)~(4)}。著者らの知るかぎり液滴制御以外の磁性流体インクジェットプリンタの研究としては、下間ら⁽⁵⁾のノイズを用いないでクローン力を作動させて飛ばす方法が見られる程度である。そこで本研究では細管ノズルから極めて規則的に液滴が放出される均一液滴領域での液滴の生成および挙動ならびにそれに及ぼす諸因子の影響を調べるために、

第1報で報告したよりもノズル外径（ノズル内径一定）、ノズル内径（ノズル外径一定）、及び表面張力を広範囲に変えるとともに、磁気体積力、液体流量を変えてより適用範囲の広い結果を得るために実験を行う。さらに次元解析を行って、液滴生成の周期、液滴径に大きく影響する因子を明らかにする。

II 主な記号

- d。 : ノズルの外径
- d_i : ノズルの内径
- l_n : ノズルの長さ
- X : ノズルの先端と電磁石の距離
- v_a : 管内平均流速
- Q : 流量
- I : 励磁電流
- B : 磁束密度
- M : 磁化の強さ
- \bar{M} : 平均磁化の強さ
- H : 磁場の強さ
- P : 背圧
- ρ : 流体の密度
- σ : 流体の表面張力
- η : 流体の粘度
- ν : 動粘度
- μ : 透磁率
- μ_0 : 真空の透磁率
- P_s : 磁化強さ (= $\mu_0 \bar{M}$)
- D : 液滴径
- T : 周期
- D* : 無次元液滴径
- T* : 無次元周期
- k : d_i / d_o
- N_m : 磁気体積力 / 表面張力による力
- W_o : ウェーバ数
- R_o : レイノルズ数

III 実験装置および実験方法

実験に使用した流量、液滴径および周期測定装置ならびにその他の付属装置は前報⁽⁶⁾で報告したものと同じなのでこれらに関する説明は省略する。細管ノズルはガラス製と黄銅製で、外径d_o、内径d_iおよび長さl_nは表1に示す。ノズル先端は管軸に直角に研磨してある。またノズル先端と電磁石の距離xは0~7mmまで連続的に変えることができる。実験に使用し

た電磁石は全長74mm、磁極径122mmのソレイドコイルである。電源には定電流電源を用い、磁束密度Bは約0.33Tまで連続的に変えることができる。磁束密度分布を図1に示す。供試磁性流体は蒸留水で重量濃度17.5%A, 25%, 30%, 35%のものと、表面張力を変化させるために、重量濃度が17.5%一定で界面活性剤を添加した17.5%B, 17.5%C, の合計6種類であるいずれも磁性微粒子は同一のマグネタイトを使用している。これらの流体の物性値を表2に示す。なお実験中、液温を一定(13°C)保つように注意した。

表1 ノズル寸法

Nozzle	d _i μm	d _o μm	l _n mm	
G 1	120	220	4 0	Glass
G 2	160	340	4 0	
G 3	200	430	4 0	
G 4	300	560	4 0	
G 5	390	660	3 0	
B1-1	200	690	4 0	Brass
B1-2	260	690	4 0	
B1-3	300	690	4 0	
B1-4	360	690	4 0	
B1-5	410	690	4 0	
B2-1	200	340	4 0	
B2-2	200	1060	4 0	
B2-3	200	1950	4 0	
B2-4	200	2950	4 0	
B2-5	200	3950	4 0	
B2-6	200	5980	4 0	

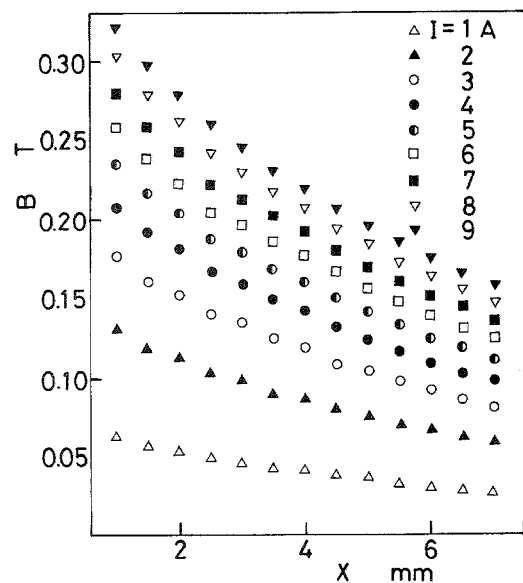


図1 磁束密度分布

表 2 磁性流体の物性値

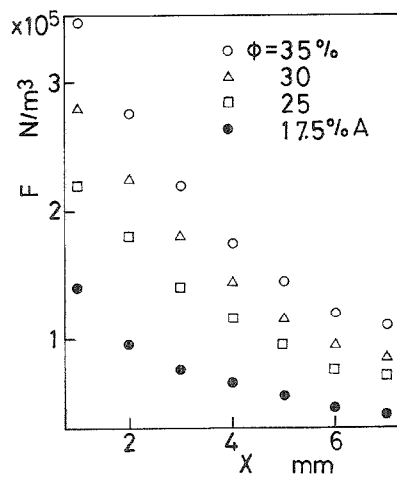
	Density ρ Kg/m ³	Surface tension σ N/m	Kinematic viscosity ν m ² /s
Water base			
35.0%	1.35×10^3	3.14×10^{-2}	8.81×10^{-6}
30.0%	1.29×10^3	3.07×10^{-2}	5.14×10^{-6}
25.0%	1.23×10^3	3.15×10^{-2}	3.33×10^{-6}
17.5% A	1.19×10^3	3.11×10^{-2}	2.52×10^{-6}
17.5% B	1.19×10^3	2.73×10^{-2}	2.61×10^{-6}
17.5% C	1.21×10^3	2.00×10^{-2}	3.61×10^{-6}

wt%

IV 実験結果および考察

4・1 磁気体積力

励磁電流 $I = 2$ A で磁性流体の濃度 ϕ を変化させた場合における電磁石-ノズル先端間の距離 x と単位体積当たりの流体に動く磁気体積力 $F = |\mu_0 \cdot (M \cdot \nabla) H|$ (μ_0 : 真空中の透磁率, M : 磁化強さ, H : 磁場強さ) の関係を図 2 に示す。この図より濃度が大きく、距離が小さいほど磁気体積力は大きくなっていることがわかる。また励磁電流が大きいほど磁気体積力も大きくなっていることと $\phi = 17.5\%$ B, 17.5% C の流体が 17.5% A のそれと同じ磁気体積力であることを確認してある。



($I = 2$ A)

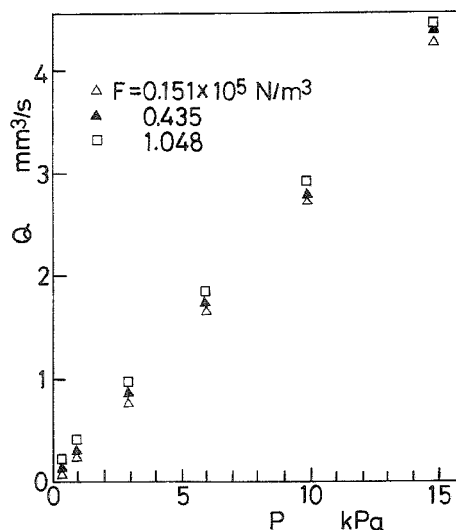
図 2 各濃度の磁性流体の磁気体積力

4・2 液滴の周期と液滴径

4・2・1 背圧と流量

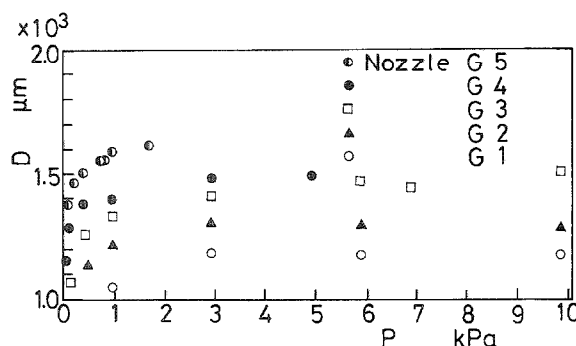
図 3 は濃度 17.5% A の磁性流体を用い、磁気体積

力をパラメータとして背圧と流量の関係を示したもので、両者は直線関係にある。これらの直線が原点を通らないのは、表面張力によって形成されるメカニズムにおける圧力増加分とそれに作用する磁気力のためである。他のノズルについての測定結果も同様である。図 4 は磁気体積力を一定として、ノズル径を変化させた場合における液滴径と背圧の関係を示す。この図より $P \leq 1$ kPa では背圧が大きいほど液滴径は大きくなるが、 $P \geq 2.94$ kPa では液滴径はほぼ一定となる。また一定の背圧に対してノズル径が大きいほど、液滴径は大きくなっている。図 5 はノズル径を一定として、磁気体積力をパラメータとした液滴径と背圧の関係で、同一の背圧においては磁気体積力が大きいほど液滴径は小さくなっている。また磁気体積力が大きいと液滴径は背圧にはほとんど影響されていないことがわかる。



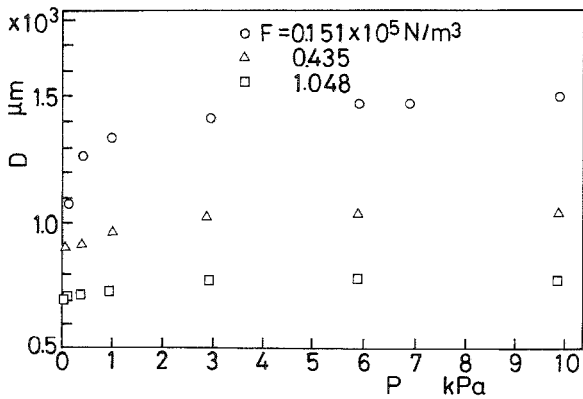
$\phi = 17.5\%$ (A), Nozzle G1

図 3 流体 - 背圧



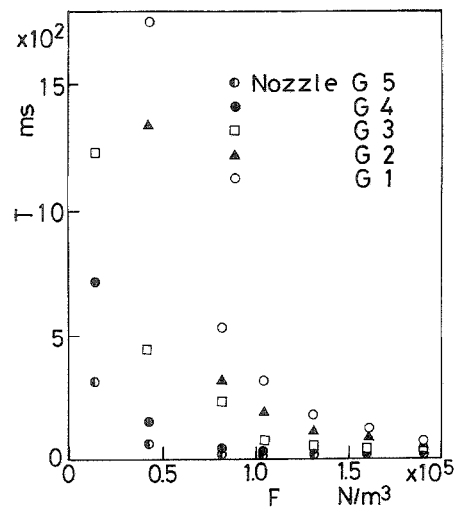
$\phi = 17.5\%$ (A), $F_m = 0.15 \times 10^5$ N/m³

図 4 液滴径 - 背圧



$\phi = 17.5\%$ (A), Nozzle G 3

図5 液滴径 - 背圧



$\phi = 17.5\%$ (A), $P = 0.39$ kPa

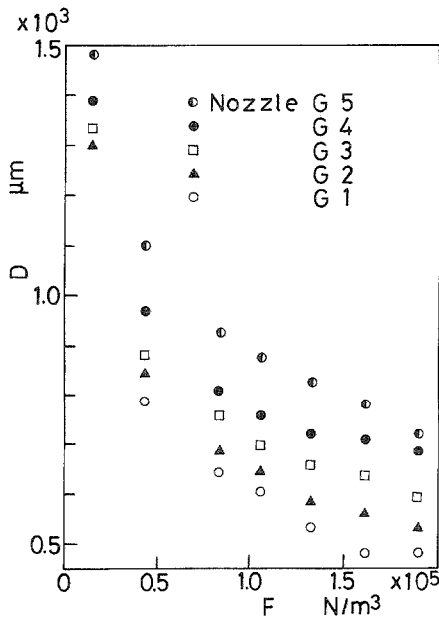
図7 周期 - 磁気体積力

4・2・2 磁気体積力の影響

図6および図7は背圧一定としてノズル径をパラメータとして液滴径Dと磁気体積力Fおよび液滴生成の周期TとFの関係をプロットしたものである。これらの図より磁気体積力が大きくなると液滴径は小さく周期は短くなっている。また一定の磁気体積力に対してはノズル径が小さいほど液滴径は小さくなっているが、周期は長くなっている。これは磁気体積力が大きく、一定の背圧に対してノズル径が小さいほど流量が減少するためである。

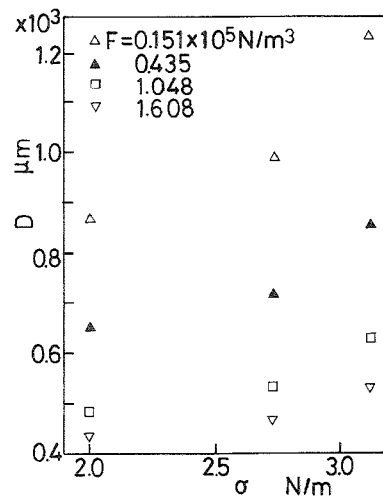
4・3 表面張力の影響

表面張力の均一液滴特性に及ぼす影響を調べるために界面活性剤(フロラドFC-129)を添加し、表面張力を変化させて実験した。図8および図9は磁気体積力をパラメータとして液滴径Dと表面張力 σ の関係および周期Tと σ の関係をプロットしたものである。これらの図より一定の表面張力に対して磁気体積力が大きいほど液滴径は小さくなり、周期は短くなっていることがわかる。また磁気体積力一定であれば表面張力が大きいほど周期は直線的に長くなっているが、液滴径は表面張力 σ が 2.73×10^{-2} N/m付近より大きくなると急に増加していることがわかる。これは、表面張力が下がると細管ノズル先端のメカニズムが低い磁場の強さでも電磁石のほうに引かれ早く液滴が飛び出していくことがわかる。



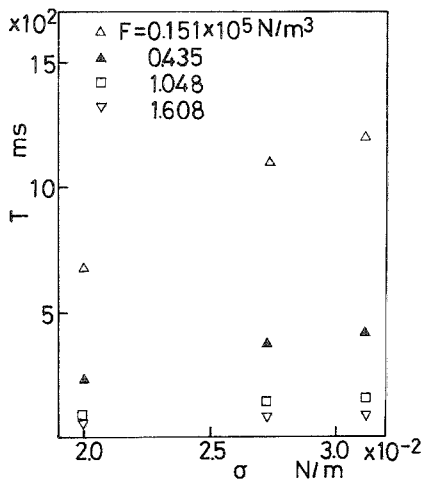
$\phi = 17.5\%$ (A), $P = 0.39$ kPa

図6 液滴径 - 磁気体積力



$P = 2.49$ kPa, Nozzle G 1

図8 液滴径 - 表面張力



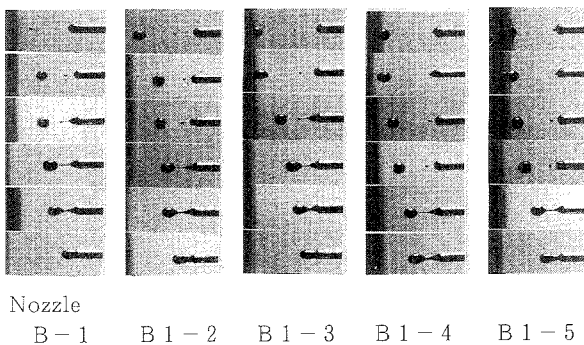
$P = 2.49$ kPa, Nozzle G 1

図9 液滴径 - 表面張力

4.4 ノズル内径の変化について

4.4.1 液滴の生成

図10は背圧 $P = 0.39$ kPa、電磁石-ノズル先端間の距離6 mmにおけるノズル内径 $d_i = 200 \mu\text{m} \sim 410 \mu\text{m}$ (外径は一定で $690 \mu\text{m}$)を変化させたときの液滴の生成を写真撮影したもので、この図から以下のことがわかる。すなわちまずノズル先端にメカニズムが生成し、ノズル外径より大きなだ円体へと成長していく。そしてメニスカスにくびれが生じ、くびれは糸をひき、ちぎれて1個の独立した、だ円体の液滴が形成される。主滴の後にサテライトが生じている。ノズルB 1-1 ~ B 1-3はサテライトが電磁石の方に飛ぶしているが、ノズルB 1-4、B 1-5はサテライトがノズルの方へと引きもどされてメニスカスに引き込まれ大きなだ円体のメニスカスとなる。



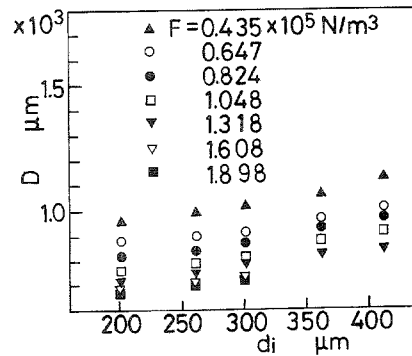
$X = 6$ mm, $\phi = 17.5\%$ (A), $P = 0.39$ kPa

$F_m = 0.824 \times 10^5$ N/m³

図10 液滴の生成

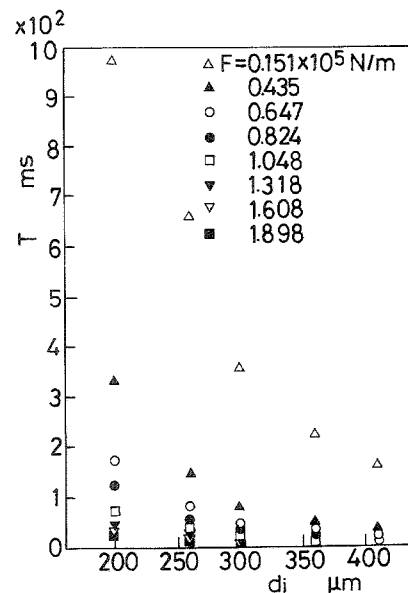
4.4.2 ノズル内径の影響

ノズル内径の影響を調べるために、ノズル外径 $d_o = 690 \mu\text{m}$ を一定とし、ノズル内径を変化させて実験を行った。背圧を一定にして、磁気体積力 F を変化させ液滴径 D とノズル内径 d_i および周期 T と d_i の関係をそれぞれ図11および図12を示す。磁気体積力一定のもとでは、ノズル内径が大きいほど液滴径は僅か小さくなっているが、周期は短くなっていることがわかる。これは同一の表面張力の作用下でノズル外径が同じなので背圧が一定であればノズル内径が大きいほど流量が増加するためと思われる。また、磁気体積力 F が大きいほど液滴径は小さく、周期は短くなっていることがわかる。



$d_o = 690 \mu\text{m}$, $\phi = 17.5\%$ (A), $P = 0.39$ kPa

図11 液滴径 - ノズル内径

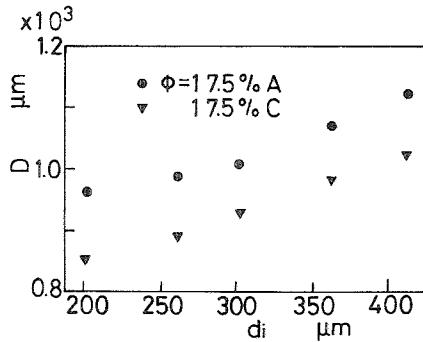


$d_o = 690 \mu\text{m}$, $\phi = 17.5\%$ (A), $P = 0.39$ kPa

図12 液滴径 - ノズル内径

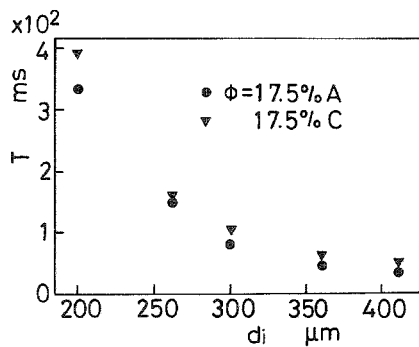
4・4・3 ノズル内径と表面張力

図13および図14は液滴径Dとノズル内径 d_i および周期Tと d_i の関係を表面張力の異なった液体をパラメータとしてプロットしたものである。一定内径のノズルであれば表面張力が大きいほど液滴径は大きくなっているが、周期は表面張力が大きいほど極く僅であるが短くなっている。また、図11および図12同様にノズル内径が大きいほど液滴径は大きく、周期は短くなっている。



$d_o = 690 \mu\text{m}$, $P = 0.39 \text{ kPa}$, $F_m = 0.435 \times 10^5 \text{ N/m}^3$

図13 表面張力における液滴径 - ノズル内径



$d_o = 690 \mu\text{m}$, $P = 0.39 \text{ kPa}$, $F_m = 0.435 \times 10^5 \text{ N/m}^3$

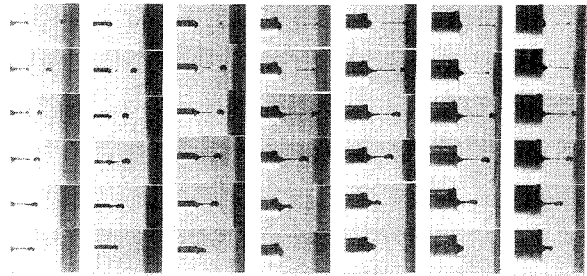
図14 表面張力における液滴径 - ノズル内径

4・5 ノズル外径の変化について

4・5・1 液滴の生成

ノズル外径の影響を調べるために、ノズル内径が等しく外径が異なる黄銅製ノズルを用いて実験を行った。図15はノズル内径 $d_i = 200 \mu\text{m}$ 一定でノズル外径 $d_o = 340 \sim 5980 \mu\text{m}$ の範囲で背圧 $P = 2.94 \text{ kPa}$ 、磁気体積力 $F = 10.48 \times 10^4 \text{ N/m}^3$ のときの液滴生成の写真撮影を示す。ノズル外径 $d_o = 340 \sim 1060 \mu\text{m}$ (B 2-1, B 1-1, B 2-3)までは、ノズル先端に生成したメニスカスはノズル外径まで付着しているが、 $d_o = 1950 \sim 598 \mu\text{m}$ (B 2-3 ~ B 2-6)の範囲ではノズル外径までメニスカスは広がっていない。し

かし各ノズルの場合とも、くびれが生じメニスカスの頭の先は少しずつ大きくなっていき、くびれが破断してだ円体となって糸を引いて飛び出す。ノズルB 2-1, B 1-1の場合は糸状が短く、すぐに球状のサテライトとなって飛んでいる。ノズルB 2-2, ~B 2-6の場合は糸状が長く、その先端と後方に球ができて、マッチ棒のようなサテライトが飛んでいる。ノズル外径が大きくなるほどサテライトの長さは長くなっている。



Nozzle

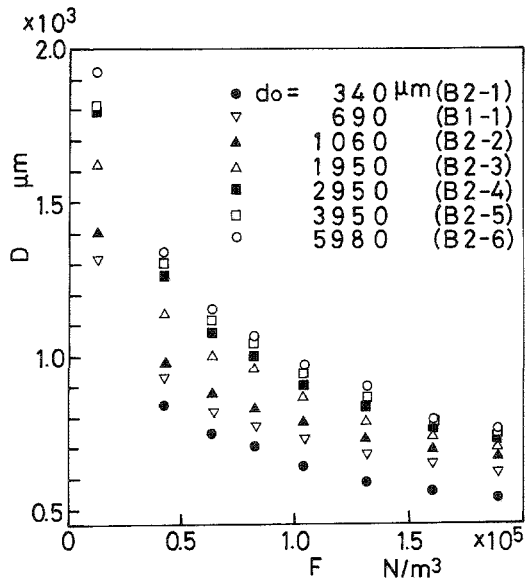
B2-1 B-1 B2-2 B2-3 B2-4 B2-5 B2-6

$\phi = 17.5\% \text{ (A)}$, $P = 2.94 \text{ kPa}$, $F_m = 1.048 \times 10^5 \text{ N/m}^3$

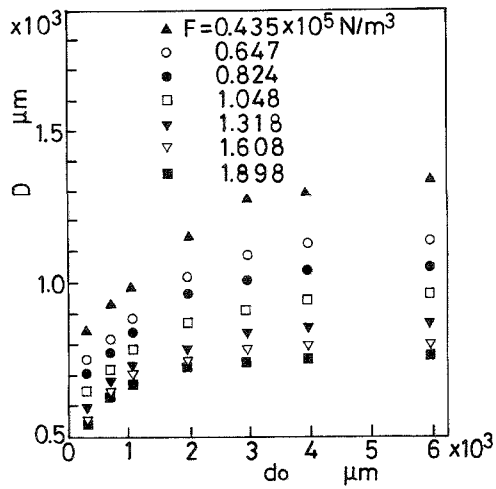
図15 ノズル外径の影響による液滴の生成

4・5・2 ノズル外径の影響

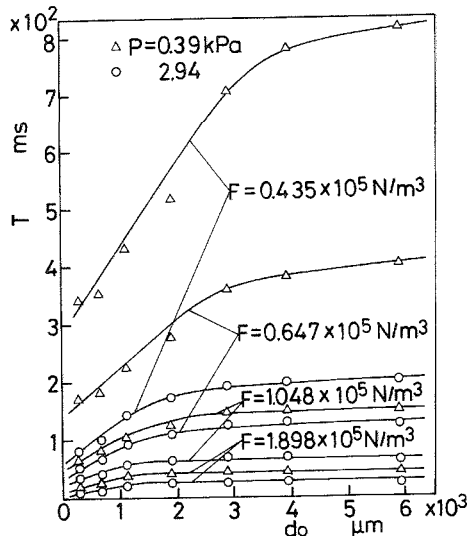
ノズル外径の影響を調べるために、ノズル内径 ($d_i = 200 \mu\text{m}$) を一定としノズル外径を変化させた。図16および図17は液滴径Dと磁気体積力Fおよび液滴径Dとノズル外径 d_o の関係を示す。これらの図よりノズル外径が大きくなるほど、液滴径が大きくなることがわかる。これはノズル外径が大きくなるほど、ノズル先端面での磁性流体の付着が広がっているためであると思われる。しかし液滴径に対して影響を及ぼすノズル外径の大きさは限度があり、図17からわかるようにノズル外径が $d_o \geq 2950 \mu\text{m}$ になると液滴径はほぼ一定となってくる。磁性流体17.5% Aを用い背圧を変えた場合における周期Tとノズル外径 d_o の関係を図18に示す。この図よりノズル外径一定ならば背圧が低いほど周期は長くなっていることがわかる。背圧 $P = 0.93 \text{ kPa}$ で磁性体積力が $F = 10.48 \times 10^4 \text{ N/m}^3$ 以下ではノズル外径が大きいほど周期は長くなっているが、Fがそれ以上では $d_o \leq 1060 \mu\text{m}$ でノズル外径が大きいほど周期は長くなるが、 $d_o \geq 1950 \mu\text{m}$ では周期は一定となる。



$\phi = 17.5\%$ (A), $P = 0.39\text{kPa}$,
図16 液滴径-磁気体積力



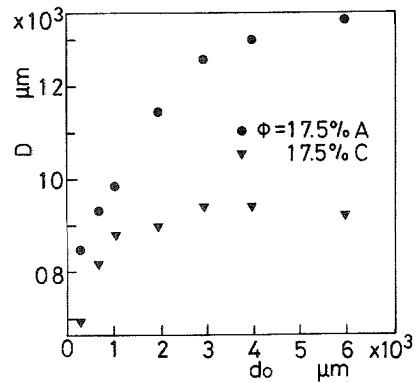
$d_i = 200\ \mu\text{m}$, $\phi = 17.5\%$ (A), $P = 0.39\text{kPa}$,
図17 液滴径-ノズル外径



$d_i = 200\ \mu\text{m}$, $\phi = 17.5\%$ (A)
図18 周期-ノズル外径

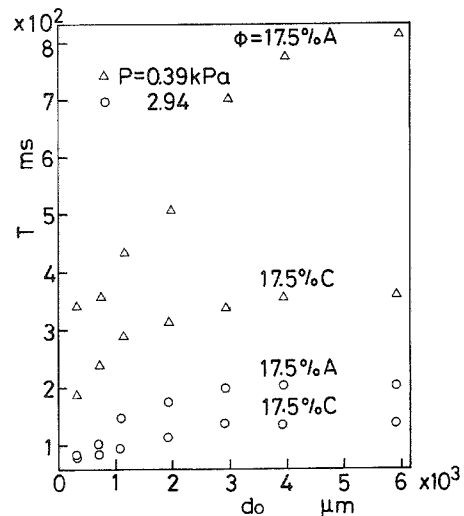
4・5・3 ノズル外径と表面張力

図19は背圧一定として、表面張力の異なった液体をパラメータとしての液滴径とノズル外径の関係を示す。これより表面張力が大きいほど液滴径は大きくなって表いるが、表面張力が小さい場合はノズル外径に関して液滴径が早く一定になることがわかる。これは表面張力が小さいために、ノズル断面に広く付着する前に電磁石の方へ引かれてしまうためと考えられる。図20は磁気体積力を一定とした場合の周期Tとノズル外径の関係を示す。この図より、周期は表面張力が小さい方が短くなっていることがわかる。また背圧 $P = 2.94\text{kPa}$ では $d_o \geq 1950\ \mu\text{m}$ で周期はほぼ一定となる。そして表面張力が小さいほど周期の一定になるノズル外径 d_o は小さくなることがわかる。



$d_i = 200\ \mu\text{m}$, $\phi = 17.5\%$ (A), $P = 0.39\text{kPa}$,
 $F_m = 0.435 \times 10^5\ \text{N/m}^3$

図19 表面張力における液滴径-ノズル外径



$d_i = 200\ \mu\text{m}$, $F_m = 0.435 \times 10^5\ \text{N/m}^3$

図20 表面張力における周期-ノズル外径

4・6 次元解析的考察

実験結果を整理するにあたり、まず以下のような考察を行う。液滴の生成すなわち液滴の周期 T および液滴径 D に影響を及ぼす因子として、ノズル内径 d_i 、ノズル外径 d_o 、磁性流体の密度 ρ 、粘度 η 、表面張力 σ 、磁化強さ $P_s = \mu_o \overline{M}$ 、印加磁場の強さ H 、管内平均流速 V_a が考えられる。ここで \overline{M} は平均磁化強さ、 μ_o は真空中の透磁率を示す。そこで液滴の生成を支配する無次元量として以下のものが挙げられる。

すなわち

$$N_m = \frac{P_s H d_o}{\sigma} = \frac{\mu_o \overline{M} H d_o}{\sigma}$$

$$\propto \frac{\text{磁気体積力}}{\text{表面張力による力}}$$

$$K = \frac{d_i}{d_o} = \frac{\text{ノズル内径}}{\text{ノズル外径}}$$

$$W_e = \sqrt{\frac{\rho V_a^2 d_i^2}{\sigma d_o}} = V_a d_i \sqrt{\frac{\rho}{\sigma d_o}}$$

$$\propto \frac{\text{慣性力}}{\text{表面張力による力}}$$

$$R_e = \frac{\rho V_a d_i}{\eta} \propto \frac{\text{慣性力}}{\text{粘性力}}$$

ここで W_e 、 R_e はウェーバ数、レイノルズ数を示すよって無次元液滴径 D^* は

$$D^* = \frac{D}{d_o} = f(k, N_m, W_e, R_e) \quad (1)$$

無次元周期 T^* は

$$T^* = \frac{T V_a}{d_o} = f(k, N_m, W_e, R_e) \quad (2)$$

と書き表すことができる。図21は無次元液滴径 D^* を整理した結果を示す。すなわち、 D^* の実験式として

$$D^* = 1.84 k^{0.288} N_m^{-0.294} R_e^{-0.013} W_e^{0.014} \quad (3)$$

が得られる。図22は液滴の無次元周期 T^* を整理した結果を示す。これより

$$T^* = 2.34 k^{-0.924} N_m^{-0.598} R_e^{0.012} W_e^{0.011} \quad (4)$$

なる実験式を得る。但し両図とも各濃度に対するデータはノズル寸法G1~G5、B1-1~B2-6のものを含んでいる。

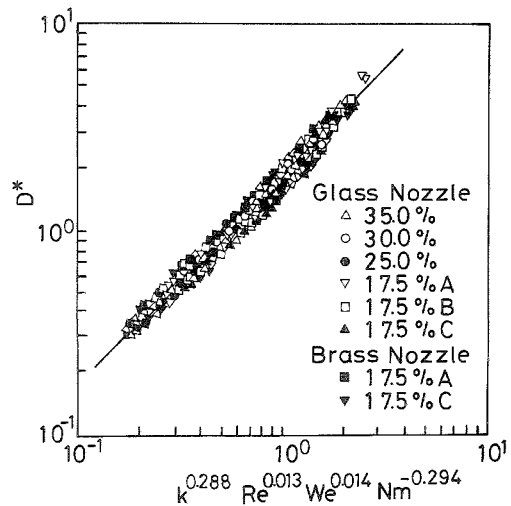


図21 $D^* - k^{0.288} R_e^{0.013} W_e^{0.014} N_m^{-0.294}$

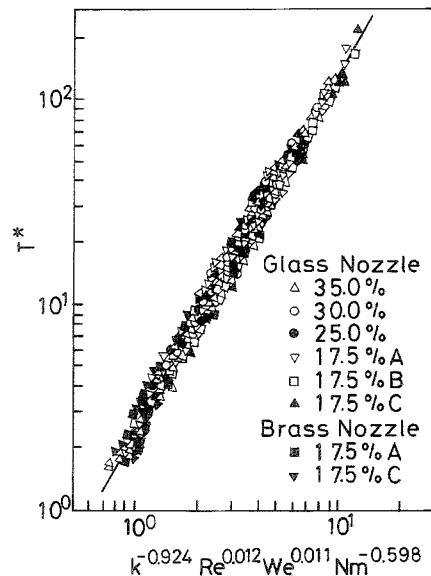


図22 $T^* - k^{-0.924} R_e^{0.012} W_e^{0.011} N_m^{-0.598}$

V 結論

磁性流体液滴の挙動の基礎的研究の一環として、本研究では種々のノズル径を用い、また磁性流体の表面張力を変えて液滴の生成過程およびその挙動を実験的に調べるとともに次元解析的考察を行った。その結果以下のことが明らかになった。

- (1) 液滴径はノズル内径および表面張力が小さく、磁気体積力が大きいほど小さくなる。
- (2) 液滴生成の周期はノズル内径および磁気体積力が大きく、表面張力が小さいほど短くなる。
- (3) ノズル外径一定で、ノズル内径を変えた場合、ノズル内径が大きいほど液滴径が大きく、周期

は短くなる。

- (4) ノズル内径一定でノズル外径を変えた場合、ノズル外径が大きくなれば液滴径も大きくなり、周期は長くなる。しかしノズル外径がある大きさ以上になると液滴径および周期は一定となる。そして背圧が大きく、表面張力の小さい方が液滴径、周期の一定になるノズル外径が小さくなる。
- (5) 無次元液滴径 D^* および無次元周期 T^* は k , N_m , R_m , W に依存する実験式によって表される。

[参考文献]

- (1) Helinski, e, f., IBM, Tech Discl Bull., 18-4 (1975), 1053.
- (2) Fan, G, J., IBM, Tech Discl Bull., 18-4 (1975), 1277.
- (3) Fan, G, J., IBM, Tech Discl Bull., 18-8 (1976), 2699.
- (4) McCurry, R, E., IBM, Tech Discl Bull., 19-10 (1977), 3705.
- (5) 下間・永広, 工業材料, 30-7 (昭和57), 50.
- (6) 石橋, 報文誌, 4-2 (1992), 21.